

## طراحی درایو موتور سوئیچ رلوکتانس بر اساس روش اجزای محدود

محمد رضا بسمی  
دانشگاه شاهد

واژه‌های کلیدی: موتور سوئیچ رلوکتانس، مدار معادل مغناطیسی، روش اجزای محدود

### چکیده

در این مقاله یک مدل مناسب برای موتور SR از بهبود مدار معادل مغناطیسی با استفاده از روش اجزاء محدود بدست آمده است. با استفاده از مدار معادل مغناطیسی بهبود یافته طیف وسیعی از عملکرد موتور نظیر شار و چگالی شار مغناطیسی در جریان‌های مختلف و زوایای مختلف نسبت به هم محوری قطب‌های روتور و استاتور بعنوان اطلاعات موتور استخراج شده است. جریان هر فاز و گشتاور هر فاز از یک موتور SR،  $6/4$  بطور دقیق مبتنی بر داده‌های ذخیره شده از عملکرد دقیق موتور SR و نیز زمان مناسب روشن و خاموش شدن سوئیچ‌ها محاسبه شده است. تعدادی از پارامترهای ابعادی و الکتریکی موتور که تاثیری در ابعاد کلی موتور ندارند بدقت مورد بررسی واقع شده است. خروجی‌های متفاوت از این تغییرات به عملکردهای متفاوت منجر می‌شود که طراح می‌تواند بهترین و مناسبترین خروجی را انتخاب نماید. ملاحظه ساختار دقیق موتور با توجه به روش اجزای محدود در طراحی درایو از نکات برجسته این مقاله می‌باشد که عموماً طراحی درایو بطور مستقل از ساختار موتور در نظر گرفته می‌شود.

### ۱- مقدمه

ماشین سوئیچ رلوکتانس (SR) در چند دهه اخیر به عنوان یک درایو سرعت متغیر مورد توجه قرار گرفته است. دلایل اصلی این توجه سادگی ساختار، هزینه ساخت کم، کنترل پذیری مطمئن، قابلیت اطمینان بالا و عمر طولانی می‌باشد [۱-۲]. با توجه به راندمان پائین موتورهای الکتریکی کوچک، رویکرد جدی به ماشین‌های الکتریکی با راندمان بالا بیش از هر زمان دیگر در کانون توجهات تولید کنندگان و مصرف کنندگان انرژی می‌باشد. از این رو تولید ماشین‌های الکتریکی با راندمان بالا و قابلیت‌های کنترل پذیری بالا، بیشتر از هر زمان دیگر مورد نیاز می‌باشد.

تا کنون توجه زیادی به طراحی ساختار، کاهش ریبیل گشتاور، کاهش نویز صوتی، کاهش تلفات و طراحی درایو و موارد دیگر ماشین‌های SR شده است [۱-۷]. در اکثر مقالات مطالعات متمرکز بر یک جنبه خاص بوده و کمتر تاثیرات چند جانبه مورد توجه قرار گرفته شده است. در این مقاله تلاش شده است تا از مدار معادل مغناطیسی مورد توجه بعضی از محققین [۴] برای شبیه‌سازی مغناطیسی موتور SR استفاده شود و سپس مدار معادل مغناطیسی استفاده شده با استفاده از

یک نرم افزار المان محدود با استخراج تعدادی ضرایب تصحیح بهبود یابد. موتور SR مورد نظر توسط مدار معادل مغناطیسی بهبود یافته شبیه سازی شده و سپس در رنج وسیعی از تغییرات جریان فازها در زوایای مختلف روتور و استاتور از غیر هم محوری کامل تا هم محوری کامل آنالیز می شود. نتایج حاصل از این آنالیز برای استخراج رفتار واقعی موتور در هر شرایط کاری می تواند مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اطلاعات الکترومغناطیسی استخراج شده از موتور و اطلاعات ابعادی و الکتریکی موتور [۷] که در ضمیمه-الف ارائه شده است، در یک سرعت و ولتاژ خاص می توان جریان کشیده شده از هر فاز موتور را تا حد مجاز تعیین شده با ملاحظه سوئیچ زنی فازها بدست آورد. بدست آوردن جریان هر فاز بطور دقیق می تواند انتخاب صحیح لحظه روشن شدن، و خاموش شدن سوئیچ ها را مشخص کند. در نتیجه بدست آوردن گشتاور لحظه ای دقیق موتور میسر می گردد. در اکثر مقالات جریان اعمال شده به فازهای موتور با فرض روش های ایده آل کنترل جریان بصورت از پیش فرض شده به موتور اعمال می شود. همچنین لحظه روشن و خاموش شدن فازها نیز غالباً بر اساس مدل جریان اعمال شده به فازها در نظر گرفته می شود. در نتیجه گشتاور لحظه ای موتور با فرض جریان های غیر واقعی و یا رفتارهای از پیش تعیین شده بدست می آید. در این مقاله محاسبه گشتاور و توان خروجی موتور و محاسبه راندمان موتور دقیقاً مبتنی بر جریان کشیده شده از هر فاز موتور و بر اساس شرایط نسبتاً واقعی موتور می باشد. با توجه به مقدمه ارائه شده در این مقاله موارد زیر پیاده سازی می شوند:

- استفاده از یک مدار معادل مغناطیسی ارائه شده در مرجع [۴] برای موتورهای با ساختار پله ای، و بهبود آن از روش المان محدود.
- آنالیز موتور در طیف وسیعی از جریان تحریک فازها در موقعیت های متفاوت قطب های روتور و استاتور از یکدیگر و استخراج نتایج کسب شده

جهت بدست آوردن عملکرد واقعی موتور در شرایط تعیین شده.

- بدست آوردن جریان واقعی کشیده شده از موتور با توجه به مدار معادل مغناطیسی بهبود یافته و نتایج استخراج شده از آنالیز موتور، برای موتوری با تغییر برخی از پارامترهای تاثیر گذار ابعادی و الکتریکی، بدون تاثیر در پارامترهای کلی موتور نظیر ولتاژ، فرکانس و حجم موتور.
- بدست آوردن زمان مناسب سوئیچ زنی فازها برای عملکرد بهینه موتور در اثر تغییرات ساختاری و الکتریکی اعمال شده و استخراج جریان واقعی کشیده شده فازها و بدست آوردن برخی از خروجی های مورد نظر که در این مقاله عبارتند از گشتاور متوسط، راندمان، توان خروجی، نسبت گشتاور به حجم موتور و چگالی جریان

## ۲- مدار معادل مغناطیسی موتور SR

از آنجائیکه هدف بهینه سازی در ماشین رسیدن به پارامترهای بهینه موتور می باشد، لذا مدار معادل مغناطیسی که بتواند از دقت خوبی برخوردار باشد، از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از زمینه های تحقیقاتی انجام شده روی این موتورها بدست آوردن یک مدل مناسب برای مدار معادل مغناطیسی می باشد [۴]. از طرف دیگر در بهینه سازی این موتور ها علاوه بر مدل مناسب نیاز به یک مدل با پاسخ سریع نیز می باشیم. تحقیقات انجام شده نشان میدهد که محققین جهت بهینه سازی موتورهای SR هنوز از مدل های تقریبی و سریع استفاده می کنند و روشهایی نظیر المانهای محدود بدلیل طولانی بودن محاسبات، عملاً در تحلیل استفاده می شوند تا در الگوریتم بهینه سازی. در این پروژه جهت رسیدن به سرعت محاسباتی بالا و دقت خوب، از یک مدار معادل مغناطیسی مناسب که در مرجع [۴] ارائه شده، استفاده شده است. نتایج حاصل از روش المان محدود نشان می دهد که می توان این مدل را با اعمال ضرایب تصحیح بهبود بخشید.

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\epsilon(\theta, i) = \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} = \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial \theta} \times \frac{d\theta}{dt} = C_{\omega}(\theta, i) \omega_r \quad (3)$$

که در آن  $\omega_r$  سرعت حرکت روتور بوده، و  $C_{\omega}$  ضریب ولتاژ حرکتی می باشد، که بصورت زیر محاسبه می شود.

$$C_{\omega}(\theta, i) = \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial \theta} = N_p \frac{\partial \Phi(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (4)$$

۲-۴ جریان

معادله ولتاژ را برای سیم پیچ استاتور یک ماشین SR می توان بصورت زیر نوشت.

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (5)$$

که  $V$  ولتاژ ورودی سیم پیچ تحریک،  $R$  مقاومت سیم پیچ و  $i$  جریان فاز تحریک می باشد. برای ساده کردن معادله (۵) مشتق شار پیوندی را نسبت به زمان به صورت زیر می نویسیم.

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial i} \frac{di}{dt} \quad (6)$$

که در این معادله  $\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}$  همان  $C_{\omega}$  ضریب ولتاژ چرخشی می باشد. همچنین  $\frac{d\theta}{dt}$  سرعت زاویه ای روتور ( $\omega_r$ ) و  $\frac{\partial \lambda}{\partial i}$  نیز اندوکتانس جزئی،  $L_{inc}$  می باشد. با جایگذاری در رابطه (۶) داریم.

$$V = Ri + C_{\omega} \omega_r + L_{inc} \frac{di}{dt} \quad (7)$$

با محاسبه  $\frac{di}{dt}$  از رابطه (۷) داریم:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_{inc}} (V - Ri - C_{\omega} \omega_r) \quad (8)$$

در بررسی حالت دائمی موتور SR، سرعت روتور را می توان ثابت فرض نمود. بدین ترتیب با توجه به رابطه  $\theta = \omega_r t$  معادله دیفرانسیلی (۸) را می توان بصورت زیر نوشت.

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{\omega_r L_{inc}} (V - Ri - C_{\omega} \omega_r) \quad (9)$$

پس با حل معادله دیفرانسیل (۹) منحنی تغییرات جریان بر حسب زاویه روتور بدست می آید.

گرچه تا کنون مدار معادل های مغناطیسی بدلیل ساختار پیچیده ماشین نتوانسته اند مدل دقیقی را ارائه نمایند و اکثر مدل های با دقت بالا مبتنی بر تجربه کسب شده از روش المان محدود می باشند. در این مدل ناحیه هم محوری تا غیر هم محوری کامل به سه ناحیه تقسیم شده است. روش محاسبه رلوکتانس در نواحی مختلف در مرجع [۴] ارائه شده است.

## ۲-۱ حل مدار معادل مغناطیسی

منظور از حل مدار معادل مغناطیسی، محاسبه مقدار شار در هر یک از المانها می باشد. با معلوم شدن شار پیوندی سیم پیچی، در همه جریانها و موقعیت های زاویه ای ممکن، برخی از مشخصه های استاتیک نظیر شار پیوندی-زاویه روتور بازاء هر جریان استاتور، مشخصه شار پیوندی-جریان استاتور به ازای هر موقعیت زاویه ای روتور، مشخصه های اندوکتانس کلی، انرژی و کوانرژی بدست می آیند.

## ۲-۲ اندوکتانس

## الف- اندوکتانس کلی

اندوکتانس کلی هر فاز در جریان  $i$  و موقعیت زاویه ای روتور  $\theta$  بعد از استخراج نتایج حاصل از حل مدار معادل مغناطیسی بصورت زیر محاسبه می شود.

$$L(\theta, i) = \frac{\lambda(\theta, i)}{i} \quad (1)$$

## ب- اندوکتانس جزئی

اندوکتانس جزئی شیب مشخصه شار پیوندی-جریان بوده و بصورت زیر محاسبه می شود.

$$L_{inc}(\theta, i) = \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial i} \quad (2)$$

## ۲-۳ ولتاژ حرکتی

ولتاژ ایجاد شده در سیم پیچی هر فاز، ناشی از حرکت روتور، عبارتست از:

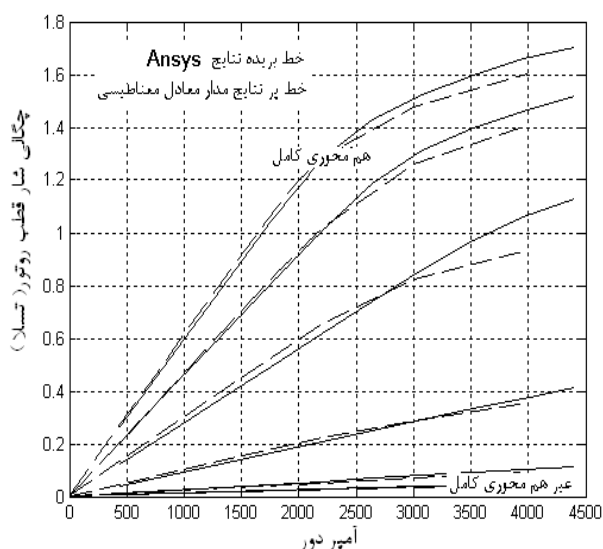
## ۵-۲ محاسبه گشتاور

برای محاسبه گشتاور لحظه ای با مشخص شدن جریان هرفاز در هر موقعیت روتور و اطلاعات ذخیره شده از شار پیوندی در قطب های روتور و استاتور در جریان های مختلف و موقعیت های مختلف روتور نسبت به استاتور می توان از رابطه کوانترژی بصورت زیر گشتاور لحظه ای را بدست آورد:

$$T_e = \frac{\partial W'_{fld}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (10)$$

## ۳- آنالیز موتور و بهبود مدار معادل مغناطیسی

موتور استفاده شده در این مقاله یک موتور SR ، ۶/۴ با مشخصات ابعادی و الکتریکی ارائه شده در ضمیمه-الف می باشد. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، مدار معادل مغناطیسی استفاده شده در این موتور با ملاحظه به روابط پیشنهادی از مرجع [۴] می باشد. تحقیقات نشان می دهد که بهترین محک جهت ارزیابی نتایج حاصل از شبیه سازی به روش های تحلیلی، مقایسه آن با نتایج حاصل از شبیه سازی با روش اجزای محدود می باشد. نتایج حاصل از مدار معادل مغناطیسی از غیر هم محوری کامل تا هم محوری کامل نسبت به نتایج اجزای محدود دارای انحراف می باشد، مقدار این انحراف در غیر هم محوری بیشتر و در هم محوری کامل کمتر می باشد، جزئیات محاسبه ضرایب تصحیح در مرجع [۸] ارائه شده است. ضرایب تصحیح اعمال شده سبب شده است تا نتایج حاصل از مدار معادل مغناطیسی تصحیح شده رفتاری مشابه نتایج حاصل از روش اجزای محدود ایجاد نماید (شکل-۱). شکل-۱ نتایج حاصل از نرم افزار Ansys و نتایج حاصل از مدار معادل را با اعمال ضرایب تصحیح مقایسه می نماید. بنابراین طراحی درایو با استفاده از مدار معادل مغناطیسی اصلاح شده که به شدت وابسته به مدل مغناطیسی موتور می باشد ارائه شده است. می توان ضرایب تصحیح را برای مدار معادل مغناطیسی استفاده شده با تغییر ابعاد هندسی توسعه داد که موضوع این مقاله نمی باشد.



شکل-۱ مقایسه نتایج حاصل از Ansys و مدار معادل مغناطیسی تصحیح شده.

## ۴- طراحی بهینه سوئیچینگ موتور SR

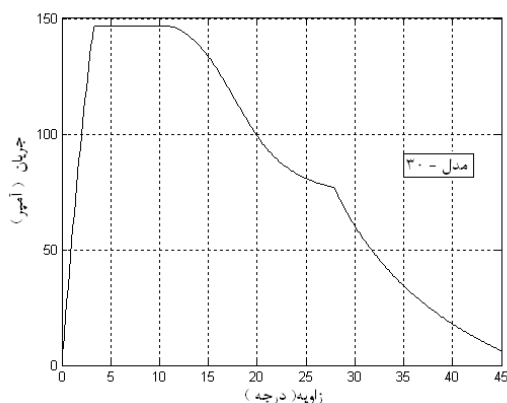
الگوریتم تحریک فازها به روش زیر می باشد:

الف - در این مقاله هر سوئیچ در یک زاویه مشخص  $\theta_{on}$  روشن و ولتاژ ثابتی را روی دو سر سیم پیچ تحریک قرار می دهد و در زاویه مشخص  $\theta_{off}$  ولتاژ معکوس به میزان همان ولتاژ تحریک اولیه روی دو سر سیم پیچ تحریک اعمال می نماید، و در زاویه  $\theta_{ext}$  ولتاژ صفر روی دو سر سیم پیچ تحریک قرار می گیرد و این فاز در این مرحله از فعالیت متوقف می شود و مرحله شروع فاز بعدی فرا می رسد. فرض شده است که  $\theta_{on} = 0$  لحظه تحریک شدن فاز در غیر هم محوری کامل باشد.

ب - فرض می کنیم تحریک با فاز A شروع شود و سپس فاز B و C تحریک شوند. اعمال ولتاژ معکوس به فاز A باید در لحظه ای صورت گیرد تا در لحظه هم محوری کامل یا  $\theta = 45^\circ$  جریان تحریک در سیم پیچ فاز A به صفر برسد.

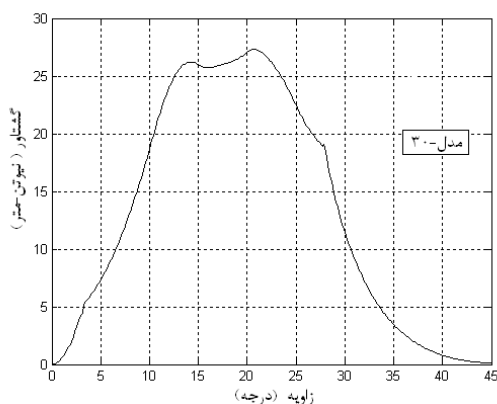
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

دقیق روشن و خاموش شدن سوئیچ‌ها مطابق شکل ۲- بدست آمده است. این روش سبب خواهد شد تا بیشترین راندمان از مدل استفاده شده حاصل گردد. برای نمونه جریان و توان کشیده شده از یکی از فازها در مدل-۳۰ بترتیب در شکل-۳ و ۴ ارائه شده اند.



شکل ۳- جریان یکی از فازها با استفاده از

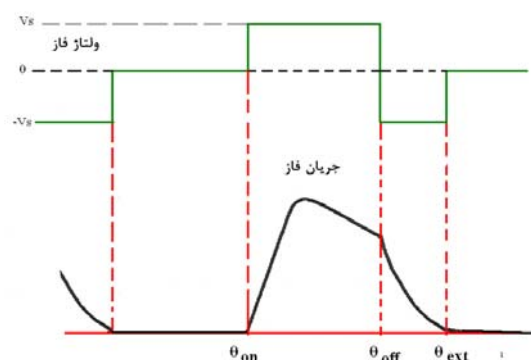
مدار معادل مغناطیسی تصحیح شده برای مدل-۳۰.



شکل ۴- گشتاور حاصل از جریان شکل ۳- با استفاده از

مدار معادل مغناطیسی تصحیح شده، برای مدل-۳۰.

لازم به تذکر است که در این مقاله با صفر کردن جریان هر فاز در انتهای کموتاسیون از ایجاد گشتاور منفی جلوگیری شده است. این عمل سبب افزایش راندمان خواهد شد. اما ریپل گشتاور را نمی‌توان بطور قابل ملاحظه ای کاهش داد. در صورتیکه کاهش ریپل گشتاور هدف اصلی باشد می‌توان ریپل گشتاور را بیشتر کاهش داد، به شرطی که راندمان



شکل ۲- روش روشن و خاموش شدن یکی از سوئیچ‌ها.

در شکل-۳ برای شرایطی خاص از عملکرد موتور که با مدل-۳۰ در بخش بعدی نشان داده شده است، با اعمال ولتاژ معکوس در  $\theta_{off} = 24^\circ$ ، جریان فاز در  $\theta = 45^\circ$  به صفر میرسد. در صورت باقی ماندن جریان در این فاز با عبور روتور به زاویه بیشتر از  $45^\circ$  گشتاور منفی به روتور اعمال خواهد شد و سبب کند شدن دور موتور می‌شود. لذا  $\theta_{off}$  جهت برآوردن شرط فوق باید بطور دقیق تنظیم شود. در نتیجه نیاز به یک مدار معادل مغناطیسی دقیق می‌باشیم تا این تنظیم انجام شود، در غیر اینصورت موتور با راندمان مناسب کار نخواهد کرد. ج - با توجه به اینکه فاز بعدی نیز از غیر هم محوری کامل تحریک می‌شود، لذا کموتاسیون دو فاز متوالی حداکثر ۱۵ درجه خواهد شد. با توجه به اینکه در زمان کموتاسیون، فازها از همدیگر مستقل هستند و می‌توان از اثر متقابل فازها صرف‌نظر نمود، می‌توان به سادگی گشتاور لحظه ای موتور را استخراج نمود. شکل-۴ گشتاور تولید شده توسط یکی از فازها نشان می‌دهد.

د- در این مقاله مشخصات ابعاد داخلی و الکتریکی موتور تغییر داده شده است. با تغییر هر متغیر یک مدل برای موتور منظور شده است. تعداد مدل‌های انتخاب شده در این مقاله جهت بررسی ۳۴ مدل می‌باشد. مشخصات ابعادی و الکتریکی مدل‌های مورد مطالعه در جدول-ب در پیوست-ب ارائه شده است. برای هر مدل زاویه

تحقیقات انجام شده در خصوص موتورهای SR بالا بودن راندمان این موتورها نسبت به موتورهای AC می باشد. بنابراین جایگزینی موتورهای با راندمان بالا بجای موتورهای قدیمی با افزایش قیمت سوخت کاملاً مقرون بصره می باشد. بهترین موتور برای جایگزینی با موتور قدیمی، موتوری است که ابعاد آن از ابعاد موتور قبلی بیشتر نشود. یا بعبارت دیگر موتور جدید با ابعاد استاندارد شده موتورهای قدیمی طراحی شود. در این مقاله ابعاد خارجی یک موتور SR بصورت ثابت در نظر گرفته شده است. با تغییر ابعاد داخلی موتور و مشخصات الکتریکی موتور تلاش شده است تا حداکثر عملکرد موتور حاصل گردد.

#### ۶-۲ تغییر ابعاد هندسی موتور

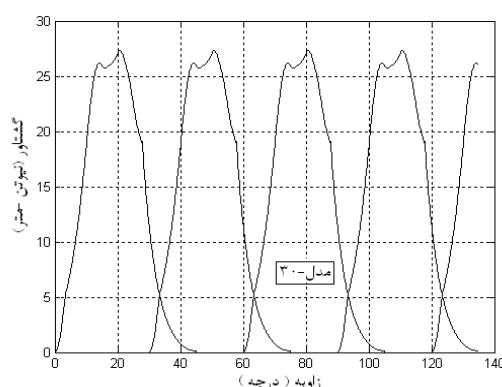
- تغییر زاویه کمان روتور و استاتور
  - تغییر فاصله هوایی
- #### ۷-۲ تغییر مشخصات الکتریکی موتور

- تغییر تعداد دور سیم پیچی
- تغییر آمپر دور موتور

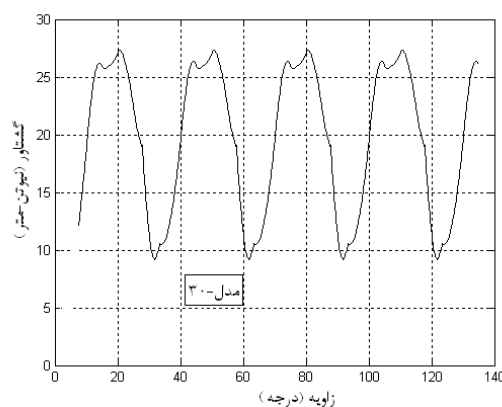
با توجه به هر تغییر داده شده زاویه خاموش شدن سوئیچ هر فاز بدقت مطابق مطالب بیان شده در بخش قبلی بدست می آید، بعبارت دیگر برای هر مدل درایو مناسب موتور طراحی می شود. به ازای هر تغییر نسبت به ابعاد اولیه داده شده در ضمیمه الف یک مدل برای ماشین بدست می آید. جهت بررسی مناسب برای بدست آوردن یک موتور با شرایط کاری مطلوب، ۳۴ مدل برای موتور بررسی شده است. در این بررسی ابعاد یوغ روتور و استاتور ثابت فرض شده است. نتایج مدل های حاصل برای خروجی مورد نظر در شکل های ۶ تا ۱۶ ارائه شده اند. مشخصات ۳۴ مدل بررسی شده در جدول ب در پیوست ب ارائه شده است.

شکل ۶- نتایج مدل های مختلف نسبت به راندمان محاسبه شده را به نمایش می گذارد. همانگونه که مشاهده می شود، مدل های ۳۱ و ۳۲ دارای بیشترین راندمان را نسبت به مدل های دیگر دارند.

کمتری را بپذیریم. در این مقاله هدف اصلی کاهش ریبیل گشتاور نمی باشد، بلکه افزایش راندمان، توان خروجی، گشتاور و هزینه تمام شده یا افزایش نسبت توان یا گشتاور به حجم موتور مورد نظر بوده است. شکل ۵(الف) عملکرد فازهای مختلف موتور را برای تولید گشتاور بصورت مجزا نشان می دهد و شکل ۵(ب) برآیند عملکرد فازها را برای تولید گشتاور نشان می دهد.



شکل ۵- (الف) گشتاور مدل ۳۰ برای فازهای مختلف



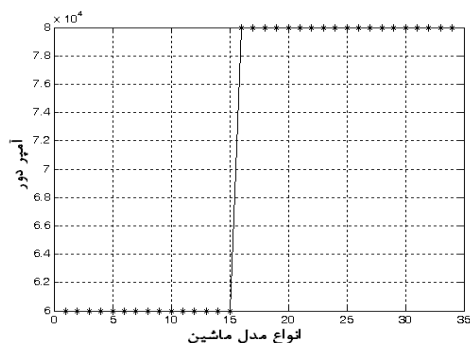
شکل ۵- (ب) برآیند گشتاور فازها برای مدل ۳۰.

#### ۴- طراحی مدل های مختلف موتور SR و مقایسه آنها

موتورهای الکتریکی درصد قابل توجهی از قطعات یک کارخانه را تشکیل میدهد. مشخصات ساختاری و الکتریکی این موتورها برای استفاده مناسب بصورت استاندارد شده در اختیار استفاده کننده ها قرار دارد. یکی از استانداردها، استاندارد فریم یا پوسته خارجی موتور می باشد. با توجه به

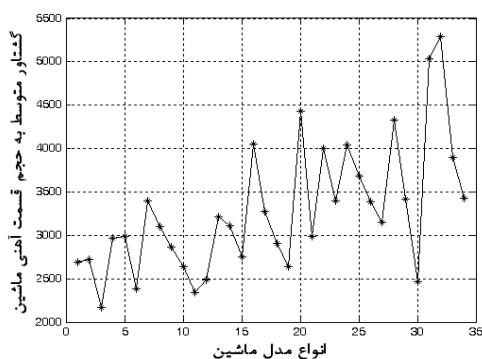
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

در طراحی ماشین های الکتریکی آمپر دور مقادیری بین ۲۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰۰ را شامل می شود. انتخاب آمپر دور متناسب با سیستم تهویه ماشین می باشد، بنابراین سیستم تهویه ماشین مقدار مجاز انتخاب آمپر دور را مشخص می کند. شکل-۹ آمپر دور ۸۰۰۰۰ را برای مدل های ۱۶ تا ۳۴ و ۶۰۰۰۰ را برای مدل های ۱ تا ۱۵ نشان می دهد.



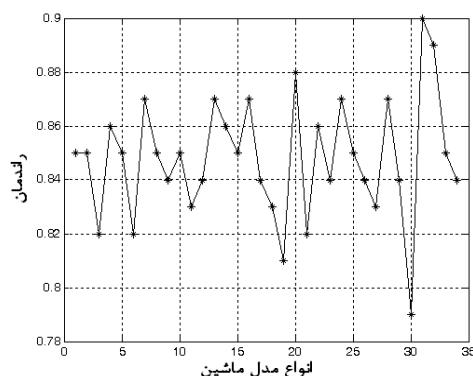
شکل (۹) آمپر دور برای انواع مدل ماشین طراحی شده.

یکی دیگر از مشخصات مهم در طراحی ماشین کاهش قیمت تمام شده بر حسب گشتاور یا توان تولیدی می باشد. شکل-۱۰ نتایج مدل های مختلف نسبت به گشتاور متوسط به حجم آهنی ماشین را نشان می دهد. مدل های ۳۱ و ۳۲ دارای توان تولیدی بیشتر نسبت به حجم دارند.



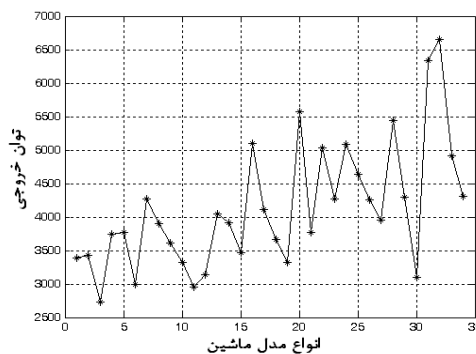
شکل (۱۰) نسبت گشتاور به حجم آهنی برای انواع مدل.

یکی از مشکلات ماشین های SR تولید ریپل گشتاور بالا می باشد. اگر بخواهیم این ریپل را کاهش دهیم می بایست مقداری از راندمان موتور را چشم پوشی کنیم. همانگونه که



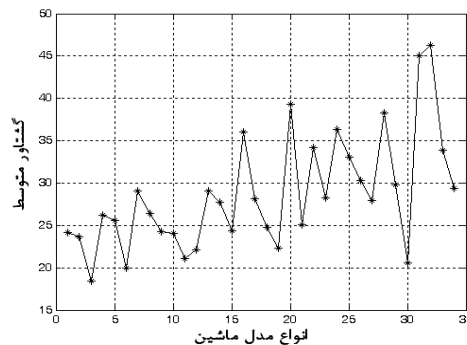
شکل (۶) راندمان برای انواع مدل ماشین طراحی شده.

شکل-۷ نتایج مدل های مختلف نسبت به توان خروجی را نشان می دهد. مدل های ۳۱ و ۳۲ دارای بیشترین توان خروجی می باشند.



شکل (۷) توان خروجی برای انواع مدل ماشین طراحی شده.

شکل-۸ نتایج مدل های مختلف نسبت به گشتاور متوسط محاسبه شده را ارائه می دهد. نظیر شکل های ۶ و ۷ مدل های ۳۱ و ۳۲ دارای بیشترین گشتاور متوسط هستند.



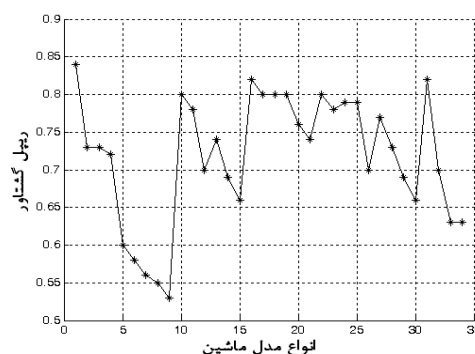
شکل (۸) گشتاور متوسط برای انواع مدل ماشین طراحی شده.

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

به سیستم تهویه موتور تنظیم می شود. با توجه به اینکه هر سه فاز در موتورهای SR بطور همزمان فعالیت نمی کنند، لذا حداکثر چگالی جریان می تواند حدود ۸ تا ۹ آمپر بر میلیمتر مربع انتخاب شود. در هر صورت مقدار چگالی جریان مجاز مشخص می کند چه مدل هائی قابل استفاده هستند. شکل-۱۳ چگالی جریان هر مدل را نشان می دهد. اگر سیستم تهویه موتور برای چگالی جریان ۷ آمپر بر میلی متر مربع طراحی شده باشد. مطابق شکل-۱۳ مدل های ۱۵ تا ۳۴ قابل استفاده نمی باشند.

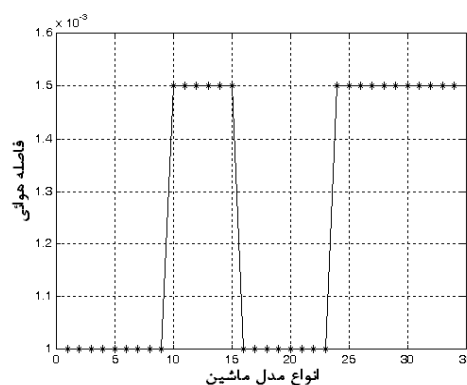
مطابق شکل-۱۴ برای کسب مشخصه های مطلوب نظیر افزایش راندمان و توان خروجی با انتخاب کمان روتور و استاتور برابر ۳۲ درجه مدل های ۳۱ و ۳۲ برتری دارند. در شکل-۱۵ تعداد دور سیم پیچی برای اهداف بیان شده بین ۱۰ تا ۲۰ دور برای هر فاز می باشد. با توجه به تعداد دور کم سیم پیچی و آمپر دور ۸۰۰۰۰، سبب خواهد شد تا سطح مقطع هادی افزایش یابد. بنابراین لزوم دارد تا از هادی های چند لایه استفاده شود. در شکل-۱۶ زاویه خاموش شدن هر سوئیچ برای هر مدل نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود زاویه خاموش شدن یا زمان خاموش شدن برای هر مدل متفاوت می باشد. بنابراین متناسب با ساختار هندسی و مشخصات الکتریکی ماشین می بایست درایو مورد نظر طراحی شود. در این مقاله برای ۳۴ مدل ارائه شده زمان روشن شدن را که مطابق با قرار گرفتن وضعیت روتور و استاتور در ناهم محوری کامل می باشد با زاویه صفر مشخص شده است و زاویه خاموش شدن برای هر مدل دقیقاً به گونه ای بدست آمده است تا جریان در فاز تحریک شده وقتیکه به هم محوری کامل میرسد به صفر کاهش یابد. زیرا در صورت باقی ماندن جریان در این فاز و با شروع فعالیت فاز بعدی، گشتاور منفی به موتور اعمال می شود. نتیجه جریان یکی از فازها برای مدل-۳۰ در شکل-۳ ارائه شده است. مشاهده می شود اگر سوئیچ در زاویه ۲۸ درجه خاموش شود، جریان باقی مانده در سیم پیچ در زاویه ۴۵ درجه تقریباً به صفر میرسد. بنابراین زاویه دقیق هر سوئیچ در شکل-۱۶ ارائه شده است.

در شکل-۱۱ مشاهده می شود مدل های ۵ تا ۹ دارای کمترین ریپل گشتاور هستند. راندمان این مدل ها با توجه به شکل-۶ به مقدار ۸۲ درصد کاهش می یابد در صورتیکه مدل های ۳۱ و ۳۲ راندمانی حدود ۰.۹ دارند. شکل-۱۱ نتایج مدل های مختلف نسبت به ریپل گشتاور را نشان می دهد.



شکل(۱۱) ریپل گشتاور برای انواع مدل ماشین طراحی شده.

فاصله هوائی در عملکرد موتورها تاثیر ویژه دارد. در این مطالعه فاصله هوائی ۱.۵ میلیمتر موتورهای با راندمان و توان خروجی بیشتر را نتیجه داده است. در صورتیکه برای موتورهای با ریپل گشتاور کمتر فاصله هوائی کمتر حاصل شده است. شکل-۱۲ تاثیر فاصله هوائی را برای انواع مدل های استفاده شده نشان می دهد.

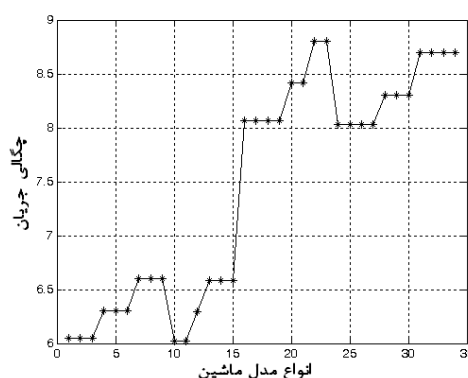


شکل(۱۲) فاصله هوائی برای انواع مدل ماشین طراحی شده.

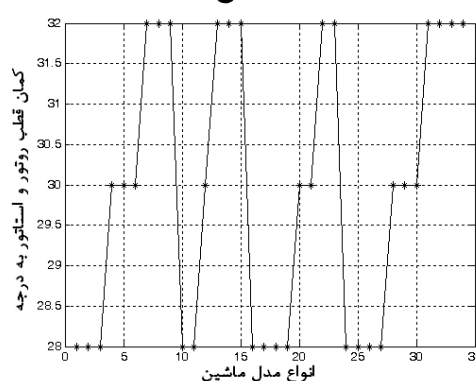
با افزایش چگالی جریان موتور می توان، توان خروجی بیشتری را از موتور کشید. لذا چگالی جریان ماکزیمم با توجه

## ۵- نتیجه گیری

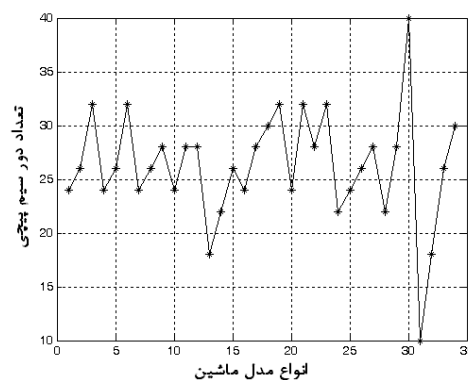
با استفاده از مدار معادل مغناطیسی ارائه شده و تصحیح نتایج آن با اعمال ضرایب تصحیح که از مقایسه نتایج حاصله با نتایج بدست آمده از نرم افزار Ansys حاصل شده است، توانستیم یک مدل نسبتاً دقیق از رفتار موتور برای کسب نتایج دقیقتر بهره گیریم. از آنجائیکه تعیین عملکرد موتور بستگی به جریان کشیده شده از آن می باشد، لذا محاسبه دقیق جریان هر فاز در یک پریود کاری برای محاسبه دقیق خروجی ها، لازم می باشد. نتایج ارائه شده مدل های مختلف جدول-ب در پیوست-ب در شکل های ۳ تا ۱۶ ارائه شده است. مطابق با نتایج بدست آمده مشاهده می شود جهت رسیدن به اهدافی نظیر افزایش راندمان، توان خروجی، گشتاور و نسبت گشتاور به حجم ماشین، مدل ۳۱ مناسب ترین مدل می باشد. مدل ۳۱ حاصل از ابعاد اولیه داده شده ماشین در جدول-الف می باشد که در آن بدون تغییر در ابعاد اصلی، تنها با تغییر کمان قطب روتور و استاتور از ۲۸ درجه به ۳۲ درجه و تغییر فاصله هوائی از ۱ میلیمتر به ۱.۵ میلیمتر بدست آمده است. در این مدل پارامترهای الکتریکی مناسب یعنی تعداد دور سیم پیچی ۱۰، آمپر دور ۸۰۰۰۰ و زاویه خاموش شدن سوئیچ ها ۲۸ درجه انتخاب شد. انتخاب فوق با روشی انجام شد تا بیشترین مقدار برای راندمان به میزان ۰.۹، توان خروجی به مقدار ۶۷۰۰ وات، گشتاور متوسط ۴۷ نیوتن-متر و نسبت گشتاور به حجم آهنی ماشین به مقدار ۵۳۰۰ نیوتن- بر متر مربع نسبت به مدل های دیگر بشود. نتایج ارائه شده یک الگوی کاربردی را جهت جایگزینی موتور SR با موتورهای قدیمی نشان می دهد. در واقع یک تابلوی شفاف از عملکرد موتورهای مختلف را در شرایط کاری نشان می دهد. زیرا تمام نتایج حاصل شده با توجه به زمان کاری بدست آمده برای موتور حاصل شده است.



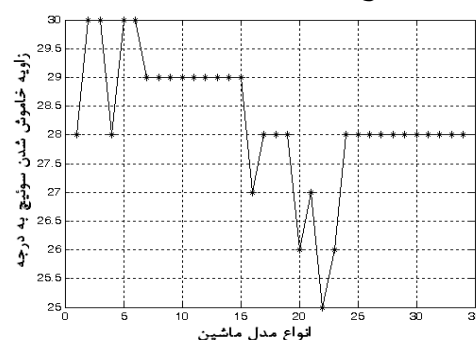
شکل (۱۳) چگالی جریان برای انواع مدل ماشین طراحی شده.



شکل (۱۴) اندازه کمان قطب روتور و استاتور برای انواع مدل ماشین طراحی شده.



شکل (۱۵) تعداد دور سیم پیچ برای انواع مدل ماشین طراحی شده.



شکل (۱۶) زاویه خاموش شدن سوئیچ هر فاز برای انواع مدل.

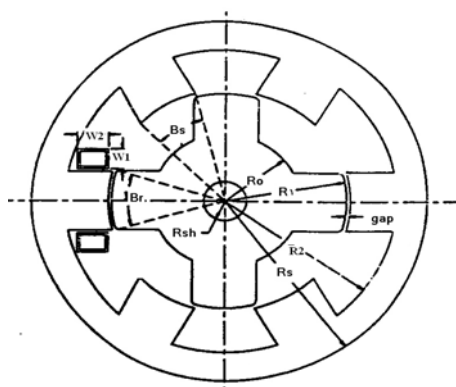
جدول (الف-۲) ابعاد اولیه ماشین بر حسب میلی‌متر

Lstk	Br	Bs	W1	W2
140	28 درجه	28 درجه	21	25

Rsh	Ro	R1	R2	R3	Lg
18	40	70	102	135	1

الف-۳ مشخصات الکتریکی ماشین

$$f=50 \text{ AT}, V_s=120 \text{ V}$$



شکل (الف-۱) شمای کلی ماشین SR مورد مطالعه

## ۶- مراجع

- [[1] Miller, T.J.E., "Brushless permanent magnet and reluctance motor", Oxford University New York, 1989.
- [[2] Miller, T.J.E., "Switched reluctance motor and their control", Oxford University, New York, 1993.
- [[3] Krishnan, R.; Arumugan, R.; Lindsay, J.F., "Design procedure for switched-reluctance motors", Industry Applications, IEEE Transactions on Volume: 24 3 , May-June 1988 , Page(s): 456 -461.
- [[4] El-Kader, F.M.A.; Osheba, S.M., "Improving transient performance of reluctance motors", Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume: 4 1 , March 1989 , Page(s): 74 -80.
- [[5] J. H. Cho, T. H. Kim, K. B. Jang and Julee, "Geometric and Electrical optimization Design of SR Motor Based on progressive Quadratic response surface method", IEEE Trans on Magnetics, Vol. 39, No. 5, Sept, 2003.
- [[6] M. Balaji, C. A. Vaithilingam, V. Kamaraj, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives", Sri Venkateswara College of Engineering, India, 2004.
- [[7] M. Moallem, C. M. Ong, L. E. Unnewehr, "Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched Reluctance Motor", IEEE Trans On Industry Application, Vol. 28, No. 2, Mar/April, 1992, pp. 364-369.

[۸]- بسمی، م، ر: طراحی بهینه ماشینهای رلوکتانسی سوئیچ شونده بر اساس الگوریتم ژنتیکی و روش اجزای محدود، طرح پژوهشی دانشگاه شاهد، کد طرح: ۷۹-۳/۱۰/۴۵۰، سال ۱۳۸۳.

## پیوست- الف

### الف - ۱ مشخصات ورق مغناطیسی

جدول (الف-۱) مقادیر B-H مورد استفاده ورقهای مغناطیسی

در روتور و استاتور:

B(T)	0	0.5	0.6	0.7	0.8
H(AT/m)	0	54	67.6	83.5	104

B(T)	0.9	1	1.2	1.4	1.6	2
H(AT/m)	131	167	298	1010	4775	44565

### الف-۲ ابعاد ماشین

ماشین مورد استفاده در شبیه ساری یک موتور SR 6/4 مطابق با شکل (الف-۱) می باشد که ابعاد آن مطابق جدول (الف-۲) ارائه می شود:

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

پیوست- ب

جدول ب پارامترهای تغییر یافته

فاصله هوایی به متر	$\theta_{off}$	تعداد دور	زاویه قطب روتور و استاتور به درجه	آمپر دور کل	مدل
۰.۰۰۱	۲۸	۲۴	۲۸	۶۰۰۰۰	۱
۰.۰۰۱	۳۰	۲۶	۲۸	۶۰۰۰۰	۲
۰.۰۰۱	۳۰	۳۲	۲۸	۶۰۰۰۰	۳
۰.۰۰۱	۲۸	۲۴	۳۰	۶۰۰۰۰	۴
۰.۰۰۱	۳۰	۲۶	۳۰	۶۰۰۰۰	۵
۰.۰۰۱	۳۰	۳۲	۳۰	۶۰۰۰۰	۶
۰.۰۰۱	۲۹	۲۴	۳۲	۶۰۰۰۰	۷
۰.۰۰۱	۲۹	۲۶	۳۲	۶۰۰۰۰	۸
۰.۰۰۱	۲۹	۲۸	۳۲	۶۰۰۰۰	۹
۰.۰۰۱۵	۲۹	۲۴	۲۸	۶۰۰۰۰	۱۰
۰.۰۰۱۵	۲۹	۲۸	۲۸	۶۰۰۰۰	۱۱
۰.۰۰۱۵	۲۹	۲۸	۳۰	۶۰۰۰۰	۱۲
۰.۰۰۱۵	۲۹	۱۸	۳۲	۶۰۰۰۰	۱۳
۰.۰۰۱۵	۲۹	۲۲	۳۲	۶۰۰۰۰	۱۴
۰.۰۰۱۵	۲۹	۲۶	۳۲	۶۰۰۰۰	۱۵
۰.۰۰۱	۲۷	۲۴	۲۸	۸۰۰۰۰	۱۶
۰.۰۰۱	۲۸	۲۸	۲۸	۸۰۰۰۰	۱۷
۰.۰۰۱	۲۸	۳۰	۲۸	۸۰۰۰۰	۱۸
۰.۰۰۱	۲۸	۳۲	۲۸	۸۰۰۰۰	۱۹
۰.۰۰۱	۲۶	۲۴	۳۰	۸۰۰۰۰	۲۰
۰.۰۰۱	۲۷	۳۲	۳۰	۸۰۰۰۰	۲۱
۰.۰۰۱	۲۵	۲۸	۳۲	۸۰۰۰۰	۲۲
۰.۰۰۱	۲۶	۳۲	۳۲	۸۰۰۰۰	۲۳
۰.۰۰۱۵	۲۸	۲۲	۲۸	۸۰۰۰۰	۲۴
۰.۰۰۱۵	۲۸	۲۴	۲۸	۸۰۰۰۰	۲۵
۰.۰۰۱۵	۲۸	۲۶	۲۸	۸۰۰۰۰	۲۶
۰.۰۰۱۵	۲۸	۲۸	۲۸	۸۰۰۰۰	۲۷
۰.۰۰۱۵	۲۸	۲۲	۳۰	۸۰۰۰۰	۲۸
۰.۰۰۱۵	۲۸	۲۸	۳۰	۸۰۰۰۰	۲۹
۰.۰۰۱۵	۲۸	۴۰	۳۰	۸۰۰۰۰	۳۰
۰.۰۰۱۵	۲۸	۱۰	۳۲	۸۰۰۰۰	۳۱
۰.۰۰۱۵	۲۸	۱۸	۳۲	۸۰۰۰۰	۳۲
۰.۰۰۱۵	۲۸	۲۶	۳۲	۸۰۰۰۰	۳۳
۰.۰۰۱۵	۲۸	۳۰	۳۲	۸۰۰۰۰	۳۴